

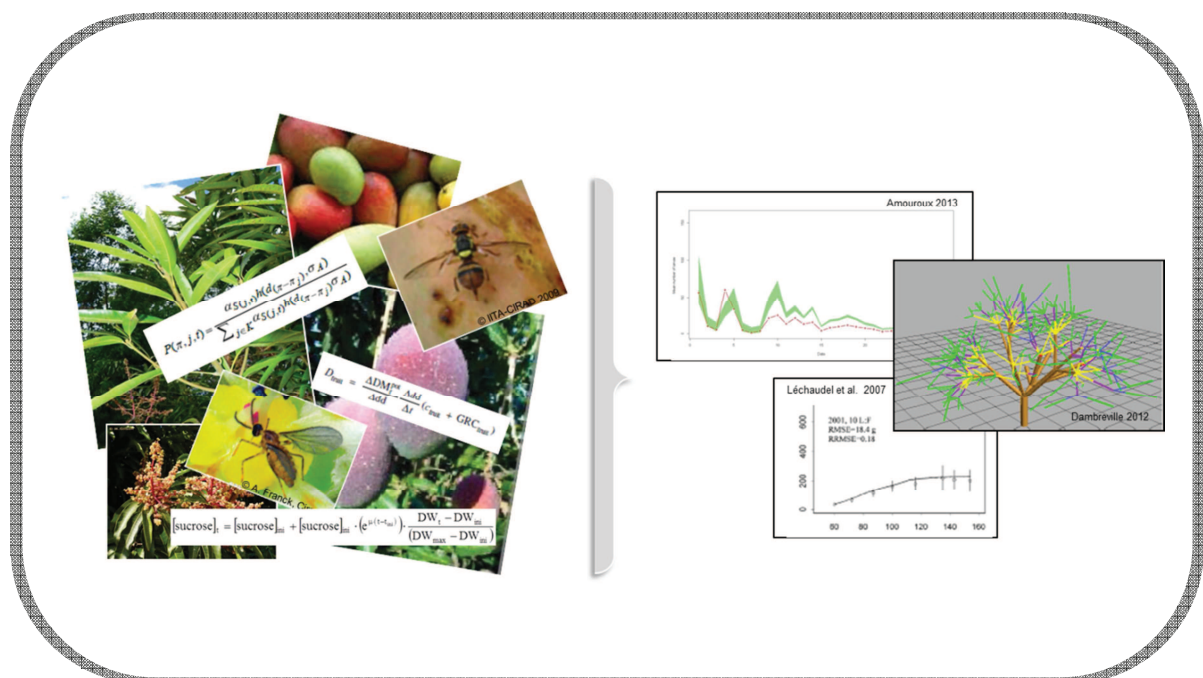
PROJET SCIENTIFIQUE

Un modèle intégré du manguier :

Acquisition et intégration de connaissances sur le système plante-ravageurs en un modèle de simulation pour l'analyse du fonctionnement de vergers de manguiers et la conception de vergers durables à la Réunion

Isabelle GRECHI (UPR HortSys)

Montpellier, Octobre 2013



1. CONTEXTE, JUSTIFICATION ET POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE DU PROJET

1.1. Mission de l'agent dans l'unité HortSys : vers un « recentrage » des activités de recherche...

Ma mission au sein de l'Unité HortSys, en tant que « **agro-écologue spécialisé dans la modélisation des agrosystèmes** », consiste à concevoir, élaborer et mettre en œuvre des modèles de simulation du fonctionnement de systèmes de culture horticoles qui prennent en compte les interactions entre les composantes végétales cultivées, l'environnement et la dynamique des populations de ravageurs et d'auxiliaires. Les modèles ainsi élaborés participeront à l'analyse du fonctionnement agro-écologique des systèmes abordés et au pilotage des communautés biologiques dans ces systèmes. Ils contribueront également à la mise au point d'outils et de méthodes de diagnostic et de pilotage des systèmes de culture destinés à la communauté scientifique ou bien aux producteurs et aux institutionnels. La compréhension du fonctionnement des systèmes de cultures horticoles et des processus bioécologiques mobilisables pour en optimiser le fonctionnement requiert la mobilisation de connaissances et de compétences de divers champs disciplinaires (agronomie systémique, entomologie, écologie, écophysiologie). La modélisation constitue un outil privilégié facilitant l'intégration de ces connaissances et les dialogues interdisciplinaires.

Depuis mon entrée dans l'unité HortSys en 2009, **mes activités de recherche ont porté principalement sur la gestion de ravageurs aériens de plantes horticoles majeures à cycle court (tomate en maraîchage) et à cycle long (verger de manguiers en arboriculture)** en Afrique de l'Ouest et aux Antilles. **En maraîchage**, nous avons évalué expérimentalement l'utilisation du pois d'angole et du maïs sucré comme plantes pièges pour contrôler les noctuelles carpophages, respectivement *Helicoverpa armigera* sur gombo au Niger (Ratnadass et al., soumis) et *H. zea* sur tomate à la Martinique (Rhino et al., soumis), dans le cadre du projet ATP Oméga3¹. S'appuyant sur ces données expérimentales et des données issues de la littérature, un modèle individu-centré a été développé sur le système tomate – *H. zea*, à l'échelle de la parcelle. Ce modèle, dynamique et spatialement explicite, représente la phénologie des plantes cultivées et des plantes pièges, le développement des stades juvéniles du ravageur, et le déplacement local et le comportement de ponte des femelles adultes en lien avec l'attractivité des plantes (Grechi et al., 2012a). Il permet ainsi d'évaluer les effets de l'introduction de plantes pièges sur la régulation des populations et dégâts de *H. zea* sur tomate, en tenant compte (i) des modalités d'agencement spatial et de la phénologie des plantes pièges, (ii) des caractéristiques des plantes cultivées et des plantes pièges (attractivité relative) et (iii) des traits de comportement de l'insecte. Une autre étude menée en collaboration avec une partenaire cubaine de l'IIHLD² a permis d'évaluer, à partir de données d'enquêtes, l'impact de pratiques agricoles sur l'infestation de parcelles de tomate par les bégomovirus (Fernandez-Delgado et al., 2013). **En arboriculture**, l'étude des interactions entre le manguiier et ses principaux ravageurs a porté sur la mouche des fruits qui est un ravageur d'importance économique du manguiier. Les relations entre le fonctionnement des agrosystèmes plurispécifiques à base de manguiier et le niveau d'infestation des mouches des fruits, en particulier *Bactrocera invadens*, ont été analysées au Sénégal. Une typologie concernant 64 vergers a été établie sur la base des pratiques des producteurs et de la structure des vergers. Il a été mis en évidence quatre types de systèmes de production, dont certains diffèrent par leur niveau d'infestation. Plus particulièrement, un niveau élevé de mouches des fruits est observé dans les grands vergers homogènes et peu diversifiés (à dominance de manguiers ou d'agrumes) présentant les niveaux d'intervention des producteurs les plus élevés (Grechi et al., 2013). Des études en laboratoire ont par ailleurs mis en évidence des effets variétaux et des effets de l'état de maturité et de l'état physiologique (avortement) des fruits sur le taux d'infestation des mangues par *B. invadens* (Diatta et al., 2013). En parallèle à ces activités, j'ai continué à valoriser des résultats de recherche acquis au cours de ma thèse (Sauge et al. 2010 ; Grechi et al., 2010 ; 2012b). Ainsi, une approche de

¹ Optimisation des Mécanismes Ecologiques de Gestion des bioAgresseurs pour une Amélioration durable de la productivité des Agrosystèmes

² Instituto de Investigaciones Hortícolas Liliana Dimitrova

conception de systèmes de culture assistée par modèle a été développée sur le système pêcher-puceron vert en collaboration avec l'unité de recherche PSH (INRA Avignon). Les outils et les approches (e.g. couplage d'un modèle de simulation avec un algorithme génétique multicritère) utilisés dans ce cadre pourront être mobilisés sur les systèmes étudiés dans l'Unité, notamment le système manguier - mouche des fruits (et/ou cécidomyie des fleurs).

Le présent projet scientifique vise à recentrer le cadre de mon intervention en ciblant une thématique de recherche jugée prioritaire pour l'Unité, à savoir l'élaboration et la mise en œuvre d'un modèle intégré ciblé mangue.

1.2. Contexte et justification du projet

L'horticulture est désormais considérée comme une composante essentielle du développement durable, de la sécurité et de l'équilibre alimentaire mondial à double titre : d'une part les systèmes horticoles ont la capacité à créer du revenu et des emplois, en particulier dans les pays du Sud, et d'autre part les apports nutritionnels spécifiques des fruits et légumes sont bénéfiques pour la santé humaine. L'horticulture doit en même temps faire face à des contraintes écologiques et des exigences sociétales en perpétuelle évolution. Des préoccupations concernant les impacts des modes de production sur la santé humaine et sur l'environnement, ainsi que des exigences en termes de qualité nutritionnelle, gustative et sanitaire des productions horticoles sont apparues dans les pays du Nord et émergent dans ceux du Sud. La question environnementale est un élément important de cette évolution et qui est d'autant plus légitime pour les cultures horticoles. Celles-ci sont en effet particulièrement sensibles aux ravageurs et les méthodes de lutte utilisées contre ces derniers font le plus souvent appel à une utilisation intensive de pesticides qui entraîne des risques sur la santé humaine et l'environnement. La prise de conscience de ces risques se traduit par une réglementation européenne de plus en plus exigeante (cf. normes sur les teneurs maximales en résidus dans les fruits et légumes, ré-homologation des produits chimiques, retrait du marché de certaines matières actives) qui vise à réduire l'utilisation de pesticides (Aubertot et al., 2005). Au niveau national, le plan 'Ecophyto 2018' a pour objectif de réduire de 50% l'usage des pesticides sur le territoire national, à l'horizon 2018, tout en limitant l'impact des pesticides qui resteront indispensables pour protéger les cultures des ravageurs. Cet objectif passe par l'identification et la conception de systèmes de production économes en intrants. Dans ce contexte, la Production Fruitière Intégrée (PFI)³ est un concept devenu stratégique et a vocation à devenir un « standard » de la production fruitière en Europe (Sansavini, 1997). La recherche agronomique est aujourd'hui sollicitée sur sa capacité à construire des systèmes de production qui répondent à des exigences sociétales en évolution. **Un défi global à relever consiste à construire des systèmes de production horticoles qui assurent une production suffisante en quantité mais aussi en qualité, tout en préservant l'environnement et en limitant les risques pour la santé humaine et les écosystèmes.**

L'unité HortSys se propose d'aborder cette question en arboriculture tropicale en choisissant le verger de manguiers comme modèle d'étude. Le manguier, cinquième production fruitière mondiale (~39 millions de tonnes en 2011; FAOSTAT), représente une culture fruitière importante en zone intertropicale pour les marchés locaux et d'export. A la Réunion, même si les surfaces en production restent aujourd'hui encore modestes, la mangue tient une place économique de choix au sein des exploitations agricoles concernées et chaque verger, s'il est conduit de manière conventionnelle voire intensive, constitue autant de sources de pollution potentielles pour l'environnement (Vincenot and Normand, 2009). Sur cette île, considérée comme un des « Hot-Spots » de la biodiversité mondiale et où l'agriculture est une activité majeure d'utilisation du milieu, les conséquences des modes de production sur l'environnement sont particulièrement exacerbées. La culture du manguier présente un certain nombre de caractéristiques liées à l'arbre et aux interactions avec son environnement qui sont autant de contraintes pour la production, la

³ La PFI est définie par l'OILB comme un système de « production économique de fruits de haute qualité donnant la priorité aux méthodes écologiquement plus sûres, minimisant les effets secondaires indésirables et l'utilisation des produits agrochimiques, afin d'améliorer la protection de l'environnement et la santé humaine » (Cross et al., 1997).

qualité des fruits et la protection contre les ravageurs. En particulier, cette espèce fruitière doit faire face i) à des rendements faibles et à une alternance interannuelle de floraison et de rendement, ii) à des asynchronismes phénologiques inter- et intra-arbres, iii) à une hétérogénéité de la qualité et de la maturité des fruits et iv) à de fortes pressions parasitaires, notamment par les mouches des fruits et les cécidomyies des fleurs. Construire des systèmes de production qui assurent un rendement suffisant tout en répondant à des exigences croissantes de qualité des fruits et en limitant les conséquences des pratiques sur la santé et sur l'environnement est une question qui est d'autant plus légitime sur ce modèle d'étude et dans le contexte réunionnais. Ces constats ont déjà motivé une dynamique d'évolution des pratiques agricoles pour la culture du manguier à la Réunion où des démarches de production intégrée se mettent en place. L'étude et le développement de nouvelles pratiques culturelles répondant aux exigences de la PFI ont été entrepris dans le cadre de programmes de recherche et opérationnels. Toutefois, il reste encore beaucoup à faire pour proposer des modes de conduite du verger de manguiers plus respectueux de l'environnement et améliorer la qualité des fruits commercialisés (Vincenot and Normand, 2009).

Ce projet propose ainsi de développer des outils et une démarche pour la conception de vergers durables, et plus spécifiquement pour la conception de modes de conduite de vergers de manguiers à la Réunion capables de limiter l'alternance interannuelle de production, d'améliorer la qualité des fruits et de réduire les impacts environnementaux en limitant l'utilisation d'intrants chimiques.

1.3. Positionnement scientifique et objectifs du projet

La problématique concernant la construction d'une démarche pour le raisonnement et la conception de systèmes de culture horticoles innovants et durables (conciliant production, qualité des produits et préservation de l'environnement) soulève des questions d'ordre méthodologique :

La construction de systèmes durables nécessite un **rapprochement entre agronomie et écologie**. L'agronomie, qui a pour objet d'étude privilégié le champ cultivé, apporte un regard technique sur la compréhension du fonctionnement de ce dernier. Elle permet d'accompagner l'évolution des pratiques agricoles en proposant des gammes d'itinéraires techniques les plus adaptés en regard d'objectifs de production fixés (Doré et al., 2006). Tant que les ravageurs étaient éradiqués par une utilisation intensive de pesticides, le raisonnement des pratiques se faisait uniquement en fonction d'objectifs agronomiques centrés sur la productivité, et plus récemment sur la qualité, mais indépendamment du risque sanitaire. Désormais, les attentes vis-à-vis des processus de production ont évolué vers des systèmes qui limitent l'utilisation de pesticides et qui, à la place, profitent des interactions et régulations biologiques inhérentes au système. Les vergers ne doivent plus être considérés comme un ensemble d'arbres sains. L'agronomie est ainsi amenée à élargir l'objet de ses investigations en prenant en compte de nouvelles interactions au sein du champ cultivé, impliquant les ravageurs ainsi que les auxiliaires. Le fonctionnement dynamique de tels systèmes peut être appréhendé à partir du concept de réseau trophique. La régulation des ravageurs relève essentiellement de deux processus interspécifiques: une régulation par les ressources (« bottom-up ») et une régulation par la prédation (« top-down »). La gestion des ravageurs, et plus largement des performances du système, peut se décliner en agronomie par diverses pratiques mettant à profit ces interactions trophiques en agissant sur la qualité et l'abondance de la plante hôte ou l'abondance des auxiliaires. Cette nouvelle vision conduit à ne plus dissocier les différents types de performance du verger dans le raisonnement des objectifs et des choix techniques (citons à titre d'exemple la « lutte culturale »). La vision agronomique permet de considérer les actes techniques et d'aborder les questions de conception et de pilotage des systèmes ; l'approche écologique permet de reconsidérer et de formaliser les interactions trophiques dans les systèmes. Ainsi, le rapprochement entre l'agronomie et l'écologie est devenu un enjeu important pour aborder la question du raisonnement de systèmes horticoles durables.

La modélisation est un outil privilégié pour l'analyse de systèmes complexes. Le recours à la modélisation dans le cas de systèmes horticoles durables nécessite un niveau poussé d'intégration des composantes biotiques et techniques précités. Le comportement dynamique et les performances de ces systèmes deviennent difficiles à appréhender car il faut

considérer simultanément i) le fonctionnement de la plante, la dynamique des ravageurs et l'ensemble des interactions au sein des communautés biologiques du système, ii) leur modulation par les facteurs abiotiques (climat) et techniques, et iii) une plus large gamme de critères de performances. La modélisation offre un cadre méthodologique adapté pour donner une vision intégrée du fonctionnement global de ces systèmes complexes et constitue un outil précieux pour une recherche interdisciplinaire. De nombreux modèles de culture ont été mis au point par les agronomes pour simuler l'impact des itinéraires techniques sur le fonctionnement du système climat-sol-plante, et évaluer et concevoir des systèmes de culture (Doré et al., 2006). Par contre, la qualité des produits est encore peu considérée dans les modèles actuels. Par ailleurs, ils ont pendant longtemps été développés sur des plantes sans problèmes sanitaires. En parallèle, les modèles simulant la dynamique des ravageurs, étaient souvent développés sans interaction avec la plante. Cette approche découplée était justifiée tant que la logique de protection reposait sur un emploi intensif de pesticides. Désormais, elle n'est plus adaptée puisque les ravageurs font partie intégrante du système de production. Les modèles liant les cultures et les ravageurs se sont développés au cours des 30 dernières années (Chander et al., 2007). Les premiers modèles se limitaient à de simples relations empiriques entre une perte de rendement et des indicateurs de niveaux d'infestation de la culture (Doré et al., 2006). A partir des années 80s, des modèles plus génériques, basés sur une représentation mécaniste des effets des ravageurs sur les performances des cultures ont été développés (Kropff et al., 1995; van Ittersum et al., 2003). Cependant, les ravageurs y sont considérés comme une variable d'entrée du modèle. D'autres approches s'appuient sur les modèles écologiques proie-prédateur (e.g. modèles de Lotka-Volterra) mais leur utilisation se restreint surtout à des études théoriques de réseaux trophiques (Hsu et al., 2003). AP Gutierrez et coll. (Université de Berkeley) ont toutefois développé, sur cette base, des modèles plus réalistes qui sont basés sur une réponse fonctionnelle d'acquisition et d'assimilation du carbone. Les modèles qui vont jusqu'à une intégration des interactions entre la plante et le ravageur d'une part, et à une incorporation des variables techniques (dont les pratiques culturales) d'autre part, restent pour l'instant limités. Le développement de tels modèles constitue un véritable enjeu scientifique. L'intégration de la qualité dans ces modèles constitue un autre enjeu important.

L'utilisation de ces modèles dans une démarche de conception de systèmes de culture horticoles innovants et durables présente une voie méthodologique privilégiée. Il existe plusieurs voies possibles pour la conception de systèmes de cultures, parmi lesquelles la conception assistée par modèles. Celle-ci offre un intérêt croissant, en particulier pour la conception de systèmes de production intégrés (Ould-Sidi and Lescourret, 2011). L'approche de conception assistée par modèle peut contribuer à réduire le recours à des expériences coûteuses et consommatrices en temps (Chatelin et al., 2007). Elle peut aussi permettre une identification rapide des meilleures options de gestion, une évaluation de leurs effets à long terme, et même l'examen de situations hypothétiques telles que le changement climatique (Mayer, 2002). Cette approche est de plus en plus étudiée comme un problème d'optimisation multi-objectif typique : résoudre ces problèmes d'optimisation nécessite de trouver un compromis entre des critères de performance antagonistes qui reflètent les préférences du décideur. Malgré les progrès récents dans l'application des approches de conception assistée par modèle pour la conception de systèmes de production intégrés, leur application au domaine agronomique est encore à ses débuts.

Pour répondre à la question de recherche concernant la construction d'une démarche pour le raisonnement et la conception de systèmes de vergers durables, appliquée ici aux vergers de manguiers à la Réunion, ce projet scientifique fixe les objectifs suivants :

(i) développer un modèle intégré du fonctionnement biotechnique du manguiier. Il s'agira plus spécifiquement de développer un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité prenant en compte le fonctionnement du manguiier, la dynamique des ravageurs et les interactions manguiier-ravageurs d'une part, et intégrant les effets des pratiques et de l'environnement d'autre part.

(ii) mettre en œuvre le modèle de simulation pour analyser le fonctionnement de vergers de manguiers, et tester et optimiser des modes de conduite du manguiier en regard d'objectifs de production fixés. La démarche s'appuiera sur une approche de conception assistée par modèle

(Ould-Sidi and Lescourret, 2011) qui a déjà été éprouvée sur une autre culture fruitière (pêcher ; Grechi et al., 2010; 2012b). La prise en compte de variables climatiques dans le modèle permettra aussi d'évaluer les performances de modes de conduites dans des situations agro-climatiques variées.

2. POSITIONNEMENT DU PROJET DANS LES AXES ET PRIORITES SCIENTIFIQUES DU CIRAD ET DE L'UNITE HORTSYS

Le projet scientifique s'inscrit dans la programmation scientifique du Cirad à travers les axes prioritaires suivants : « **Intensification écologique** » et « **alimentation accessible et de qualité** ». Le projet vise en effet à concevoir des systèmes de production de mangues plus productifs, respectueux de la qualité des produits, durables, économes en intrants et moins nocifs pour l'environnement. Le travail de modélisation permettra de proposer un outil d'évaluation des effets de choix techniques sur les performances du verger, en particulier sur la production et sa qualité, et sur la régulation des ravageurs.

Au sein de l'unité HortSys, ce projet s'inscrit dans l'**axe A (Fonctionnement agroécologique, interactions et régulations biologiques dans les systèmes horticoles, Airb)** et plus spécifiquement sur les deux premiers modèles biologiques traités par l'équipe (HortSys, 2013), à savoir : **(1) « Manguier – Déterminants endogènes et abiotiques du rendement et de la qualité »** et **(2) « Arbres fruitiers – Ravageurs aériens »**. Les recherches menées au titre du premier modèle biologique visent à la compréhension du fonctionnement du manguier en verger, pour le manipuler par des opérations culturales spécifiques en vue d'améliorer le rendement et la qualité de la production. L'ensemble de ces connaissances doivent être intégrées dans un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue. Ce modèle sera un outil central pour synthétiser les connaissances acquises et, sur cette base, explorer le fonctionnement du manguier dans différents contextes. Les recherches menées au titre du second modèle biologique visent à la compréhension des mécanismes de régulation des ravageurs dans les vergers dans la perspective d'un recours nul ou minimal aux pesticides en privilégiant l'approche « réseaux trophiques ». En parallèle, une des activités consistera à caractériser les interactions entre la plante cultivée (manguier) et les ravageurs (mouche des fruits principalement), selon deux axes : effets des caractéristiques du fruit (état de maturité et état physiologique) et du fonctionnement des vergers à base de manguier (niveau de diversification spécifique).

Le modèle intégré du manguier jouera un rôle central en interne à l'équipe Airb, en particulier à l'interface des deux premiers modèles biologiques puisqu'il prévoit le couplage du modèle plante à un modèle ravageur (mouches des fruits et/ou cécidomyie des fleurs). A plus ou moins moyen terme, le modèle pourra aussi intégrer les connaissances qui auront été acquises au titre de ce second modèle biologique sur la structure et le fonctionnement du réseau manguiers - habitats - mouches des fruits - fourmis oecophylles dans un module « lutte biologique ». *In fine*, le modèle intégré du manguier devrait permettre de tester et concevoir de véritables stratégies de gestion intégrée des vergers de manguiers combinant des méthodes culturale, biologique et chimique de gestion des ravageurs. A moyen terme aussi, ce projet devrait conduire à une collaboration entre mes activités au sein de l'axe A et les activités conduites par des collègues de **l'axe B (Méthodes et outils pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture horticoles durables, Ecos)** via le couplage du modèle intégré du manguier à un modèle décisionnel qui sera développé par l'équipe Ecos.

3. DEMARCHE SCIENTIFIQUE ET ACTIVITES PROPOSEES DANS LE PROJET

Ce projet s'insère dans une démarche collective de l'Unité, et plus particulièrement de l'équipe Airb, qu'il est indispensable de présenter dans sa globalité. Il est évident que mes activités ne permettront pas à elles seules la réalisation du projet scientifique dans son intégralité mais elles y contribueront largement. Aussi mes activités seront menées en lien étroit avec les activités des autres chercheurs de l'équipe impliqués dans le projet à la Réunion, en particulier

pour l'acquisition de nouvelles connaissances et données nécessaires à la modélisation.

Le projet est structuré en 2 axes : le développement du modèle intégré du manguiier et sa mise en œuvre.

3.1. Axe 1 : Développement du modèle intégré du manguiier

Sur la base de connaissances acquises sur les processus d'élaboration du rendement et de la qualité des fruits, les relations entre le manguiier et ses ravageurs (cécidomyie des fleurs et mouches des fruits) et les facteurs biotiques et abiotiques qui les affectent, la démarche consistera en une approche globale d'intégration de ces connaissances dans un modèle couplé 'manguiier - ravageurs' (Fig. 1).

Le **modèle 'manguiier'** intègrera un **sous-modèle plante** représentant la phénologie du manguiier et la croissance des organes végétatifs et des inflorescences, et un **sous-modèle fruit** représentant la croissance et l'élaboration de la qualité du fruit, sous l'effet de pratiques culturales et de facteurs abiotiques. Les sorties du sous-modèle plante serviront d'entrées au sous-modèle fruit. Le modèle manguiier sera développé à l'échelle spatiale de l'arbre et à l'échelle temporelle du cycle de production. Le **modèle 'ravageurs'** représentera la dynamique des mouches des fruits et/ou des cécidomyies des fleurs sous l'effet de facteurs abiotiques, des pratiques phytosanitaires, et des facteurs propres à la plante qui peuvent être modulés par les pratiques culturales (e.g. modulation de la présence de stades phénologiques sensibles). Le rendement et la qualité des fruits seront affectés négativement par les dégâts induits par les ravageurs. La prise en compte de facteurs biotiques (environnement végétal) sur la dynamique des ravageurs amènera à élargir l'échelle spatiale à celle de la parcelle, voire d'un îlot de parcelles.

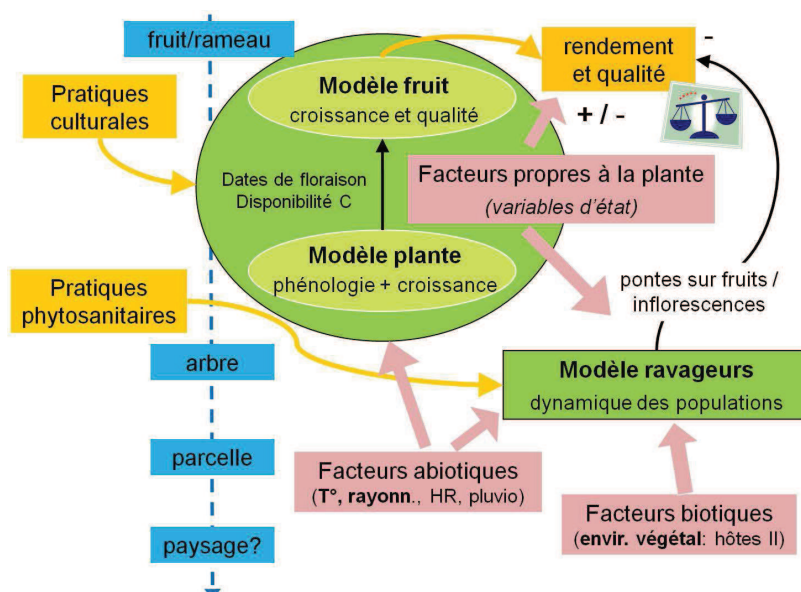


Fig.1. Représentation conceptuelle du modèle intégré du manguiier

Le modèle prendra en compte les changements d'échelle (fruit-plante-parcelle) et représentera le système de culture, y compris le mode de conduite. Il pourra simuler l'impact de l'environnement (température, pluviométrie, rayonnement) et de pratiques culturales (irrigation, éclaircissage) sur le développement et les performances du manguiier (étalement inter- et intra-arbre de la floraison et des stades sensibles aux ravageurs, rendement et qualité des fruits par arbre) et sur les interactions entre les ravageurs et le manguiier.

Un **modèle fruit** est fonctionnel à l'échelle du rameau fructifère. C'est un modèle écophysologique basé sur les échanges de carbone et d'eau entre le fruit et le rameau fructifère (Léchaudel et al., 2005; Léchaudel et al., 2007). Il prédit la croissance en matière fraîche (élaboration du calibre) et sèche, l'évolution des sucres, acides et minéraux de la mangue

(élaboration de la qualité) et intègre les effets de l'environnement (température, lumière). Des activités sont actuellement menées dans le cadre d'une thèse (Nordey, 2011-14) pour compléter le modèle avec la maturation du fruit (éthylène, H2O2). L'objectif est de modéliser l'effet des éléments déclencheurs de la maturation de la mangue et de les intégrer dans un modèle fruit couplant les modèles de croissance et de température du fruit. Des connaissances sur l'élaboration de composantes aromatiques et nutritionnelles (caroténoïdes, vitamine C, arômes) du fruit sont également en cours d'acquisition. Par ailleurs, le modèle fruit actuel a été étendu à l'arbre entier afin de simuler les distributions des dates de récolte, des calibres et des critères qualitatifs des fruits à la récolte à l'échelle de l'arbre (Léchaudel et al., 2006). Il considère cependant le manguier comme un arbre simplifié, c'est-à-dire une population de rameaux fructifères isolés. Le passage i) à l'échelle de l'arbre entier, considérés comme une population de rameaux non pas isolés mais connectées entre eux et avec le reste de la plante et ii) à l'échelle temporelle du cycle de production passe par le couplage de ce modèle fruit au modèle plante.

La démarche de construction d'un **modèle plante** basé sur un couplage d'approches architecturales, phénologiques et écophysiologiques a été engagée. L'approche phénologique s'attache à décrire la dynamique de développement du manguier, cycle après cycle, à l'échelle de l'unité de croissance (UC), en prédisant au niveau quantitatif et temporel le débourrement des bourgeons végétatifs et florifères. Elle s'appuie sur des relations étroites et réciproques entre la croissance végétative et reproductive du manguier et entre les composantes architecturales et phénologiques du développement de l'arbre. Les principales données nécessaires pour développer cette approche sont acquises (Dambreville et al., 2013a, b) et le travail a été engagé en partenariat avec l'équipe Virtual Plants de l'UMR AGAP (Jestin, 2013). L'approche écophysiologique, qui est complémentaire, a été engagée dans le cadre du projet ModQual (cf. Annexe 1). Dans ce projet mené en collaboration étroite avec l'unité PSH de l'INRA, il est question d'adapter un modèle de culture développé sur pêcher (QualiTree ; Lescourret et al., 2011) au cas du manguier, ce qui permettra de connecter la population de rameaux fructifères entre eux avec le reste de la plante (Macias, 2013). Le modèle QualiTree est basé sur la représentation de processus physiologiques liés au carbone (photosynthèse, mise en réserve/ mobilisation du C, allocation du C, respiration, croissance) et à l'eau (transpiration, transfert de l'eau, croissance) et considère les échanges de C entre les différents compartiments de l'arbre (i.e. vieilles racines, jeunes racines, vieux bois et rameaux fructifères). Il prend également en compte l'architecture de l'arbre et les effets de pratiques culturales. Cette adaptation, et plus généralement le couplage des approches phénologiques et écophysiologiques, pose cependant des questions méthodologiques par exemple pour l'intégration de l'UC (unité de base du modèle de phénologie) dans la structure du modèle écophysiologique.

Le développement du **modèle ravageur** peut s'appuyer sur des données en cours d'acquisition. Pour la **cécidomyie des fleurs**, des travaux menés sur sa bio-écologie, son cycle biologique, ses interactions avec le manguier et sa dispersion dans les vergers ont permis de développer un premier modèle stochastique et mécaniste représentant la dynamique de distribution du ravageur dans un verger en fonction de la distribution spatio-temporelle des stades sensibles des manguiers (Amouroux, 2013). Pour les **mouches des fruits**, des travaux ont mis en évidence l'effet de l'état de maturité et de l'état physiologique des fruits sur leur taux d'infestation par les mouches des fruits (Diatta et al, 2013). Dans un premier temps, pour coupler le modèle 'ravageur' au modèle 'manguier', il est nécessaire d'identifier parmi les modifications biochimiques et physiques du fruit qui se produisent à l'approche et au cours de la maturation les facteurs impliqués dans l'attractivité du fruit pour les mouches. La fermeté du péricarpe, les composés volatiles, et la couleur du fruit sont des facteurs potentiels (Jayanthi et al., 2012; Rattanapun et al., 2009). Suivant les facteurs qui seront identifiés expérimentalement, et suivant notre capacité à les modéliser, on envisagera un modèle écophysiologique ou bien un modèle empirique basé sur un indicateur de maturité. On représentera ensuite le risque d'infestation des fruits par les mouches par une fonction épidémiologique prenant en compte ces facteurs (ou indicateur de maturité) et la densité de mouches dans l'environnement (Fig. 2).

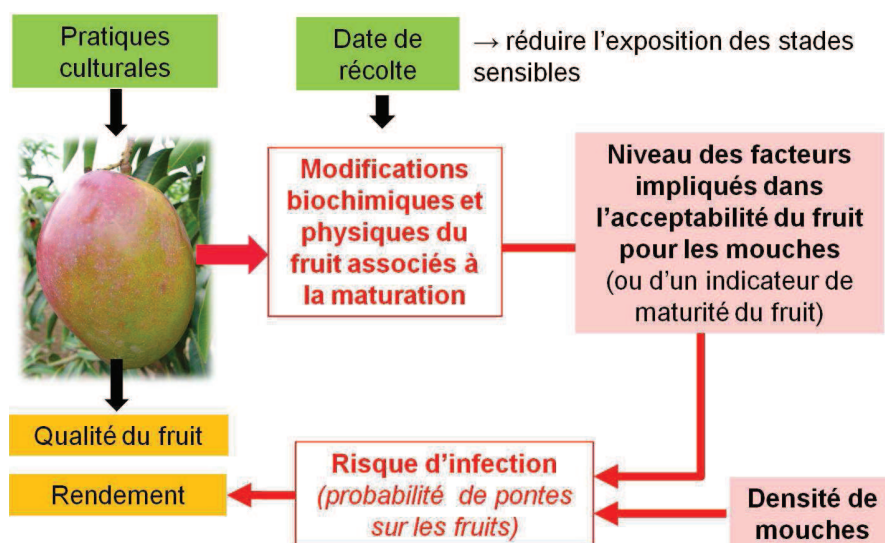


Fig.2. Représentation conceptuelle de l'interaction manguier – mouches des fruits

L'acquisition de données dans le cadre d'essais menés à la Réunion et l'initiation du modèle sont prévues en 2014 (projet ModQual). Dans un deuxième temps, il s'agira de prendre en compte les effets du fonctionnement des vergers (niveau de diversification spécifique pour les vergers à base de manguier et distribution spatio-temporelle des stades sensibles des arbres) et de facteurs biotiques (environnement végétal) sur la dynamique des mouches des fruits.

Dans le cadre de ce projet mon intervention concernera surtout le développement de l'approche écophysologique sur le modèle 'plante' et le développement du modèle 'ravageur'. Elle s'attachera également à adapter les autres sous-modèles pour l'intégration de l'ensemble au sein du modèle intégré du manguier.

3.2. Axe 2 : Mise en œuvre du modèle pour l'analyse du fonctionnement de vergers de manguiers et l'optimisation de modes de conduite en regard d'objectifs de production fixés.

Une fois que le modèle intégré du manguier aura été développé, il pourra servir d'outil de simulation pour :

- aider à la compréhension du fonctionnement du système,
- tester et concevoir des modes de conduite en regard d'objectifs fixés,
- évaluer les performances du système dans d'autres contextes variétaux et/ou climatiques (zone géographique, changement climatique).

Pour la conception de modes de conduite, une approche de conception assistée par modèle sera développée et appliquée à la conception de vergers de manguiers durables à la Réunion (Fig. 3). La 1ère étape de cette démarche consiste à fixer pour l'objet à concevoir un cadre de contraintes techniques et d'objectifs qui doivent être hiérarchisés et transformés en indicateurs quantifiables. Dans la 2ème étape, le domaine des options techniques possibles est exploré. Les scénarios sont définis comme un ensemble d'options de gestion fixes ou de règles de choix flexibles (de type « Si... tel état », « Alors... telle option technique »). Cette démarche repose sur un dialogue étroit entre le modèle dynamique de fonctionnement du système et des scénarios techniques. Si les scénarios sont définis par des règles de choix flexibles, le modèle établit au cours d'une simulation les conditions qui déclenchent l'application de ces règles (3), et les résultats de cette application (1) sont des choix techniques qui participent à l'étape suivante (2). Sur l'exemple illustré sur la Fig. 3 les scénarios techniques testés sont prédéfinis mais il est possible que les scénarios soient auto-générés par le modèle au cours du processus de modélisation via des méthodes d'optimisation appropriées. Les résultats sont à la fois les performances simulées et les choix techniques (dont on peut par exemple déduire les coûts) induits par le(s) scénario(s) simulé(s). Ces sorties serviront de critères

d'évaluation: leur analyse permet d'identifier les scénarios les plus intéressants. Ces scénarios candidats seront ensuite testés en conditions réelles.

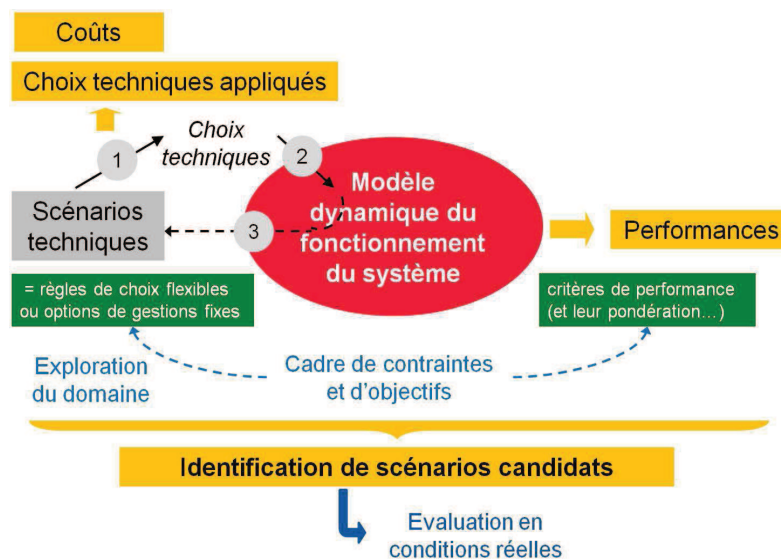


Fig. 3 Illustration de la démarche de conception de systèmes assistée par modèle

Cette démarche a déjà été éprouvée pour la conception d'itinéraires techniques qui optimisent le compromis entre des critères de performance antagonistes (i.e. productivité du système, durabilité du système, qualité des fruits et respect de l'environnement) dans le cas de vergers de pêcheurs en PFI (Grechi et al., 2012b). Elle a également été éprouvée par les partenaires du projet ModQual (INRA PSH et GAFL) pour la conception d'idéotypes variétaux qui optimisent le compromis entre la qualité des fruits et leur sensibilité à une maladie fongique pour différents contextes de gestion techniques des arbres (Quilot-Turion et al., 2012).

4. MISE EN ŒUVRE « OPERATIONNELLE » DU PROJET

4.1. Moyens humains et montage financier

Ce projet s'inscrit sur une thématique jugée prioritaire pour l'Unité HortSys : le développement d'un modèle intégré du manguiier. Les actions menées sur le premier modèle biologique traité par l'équipe Airb (« Manguiier – Déterminants endogènes et abiotiques du rendement et de la qualité » ; ancien volet 3 du projet scientifique Airb) sont menées à la Réunion. La réalisation de ce projet implique l'affectation d'un chercheur agro-écologue modélisateur (I. Grechi) à la Réunion pour renforcer les moyens humains et les compétences présents localement.

Le poste sera financé à hauteur de 80% sur le FEDER Réunion 2014-2020 sur lequel est affiché le projet 1 du DP COSAQ. Pour le fonctionnement, les activités de recherche pourront s'appuyer, au moins dans un premier temps, sur le Projet ModQual (2013-2015 ; action clé Damage du métaprogramme SMaCH INRA – cf Annexe 1), mené en collaboration étroite avec l'unité PSH de l'INRA d'Avignon. Ce projet vise à développer un cadre de modélisation générique guidée par les processus pour analyser et quantifier les pertes de qualité du fruit induites par les ravageurs et les techniques et géotypes choisis pour limiter les pertes de récolte. Il est attendu que ce projet serve de tremplin pour le financement de projets plus ambitieux visant d'une part à consolider ce cadre de modélisation et d'autre part à élargir ses contours en abordant la dimension socio-économique (aspects réglementaires, marchés et labels, compromis rendement/qualité, attitude des consommateurs, etc.).

4.2. Intégration géostratégique et partenariats

A la Réunion, ce projet s'inscrira dans le **DP COSAQ (Co-conception de systèmes agro-alimentaires de qualité)** :

- dans un premier temps il s'inscrira dans le **projet 1 (Bases biologiques et techniques pour la co-conception de systèmes agroalimentaires de qualité)** du dispositif, et plus spécifiquement dans l'**action 1 (Identifier et modéliser les déterminants du rendement et de la qualité des produits agricoles et agroalimentaires)**. Cette action 1 a notamment pour objectif la construction d'un modèle d'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue.
- par la suite, l'utilisation du modèle pour de la conception de systèmes durables relèvera du projet 2 (Bases agro-économiques de la conception de systèmes agroalimentaires et de modes de valorisation innovants). Cette étape ne sera envisagée qu'à moyen terme.

Ce projet constituera également un **cadre privilégié pour développer des interactions avec les activités menées par l'Unité en Afrique de l'Ouest au sein du DP Divecosys**. Dans le cadre du projet de l'équipe Airb, il est programmé de tester et d'appliquer la généricité des méthodes et résultats obtenus à La Réunion sur manguier dans d'autres contextes climatiques. A ce titre, une étude des déterminants de l'élaboration du rendement et de la qualité de la mangue en climat subsahélien au Sénégal est en cours (Diatta, 2013-16). Dans le cadre du projet scientifique, il est envisagé que le modèle 'manguier' développé à la Réunion soit adapté au contexte sénégalais pour une variété commune (Kent). En parallèle, l'ensemble des connaissances sur les interactions entre le manguier et les mouches des fruits qui seront acquises à la Réunion (i.e., effets des caractéristiques physiologiques du fruit sur sa sensibilité) et en Afrique de l'Ouest (i.e., effets du fonctionnement des agroécosystèmes fruitiers et de la structure paysagère sur la dynamique des mouches et les processus de régulations biologiques), en particulier sur le genre *Bactrocera* qui est commun aux deux contextes, pourront être confrontées et intégrées au modèle 'ravageurs'. De telles interactions sont déjà en œuvre avec mon implication dans le co-encadrement de deux thèses conduites au Sénégal à l'UCAD et à l'ISRA (Grechi et al 2013 ; Diatta et al 2013).

Des partenariats nationaux seront privilégiés avec les équipes suivantes : INRA PSH (modèles plante et fruit ; approches écophysiologiques) ; INRA AGAP équipe AFEF ; Cirad AGAP équipe Virtual Plants (modèle plante : approches architecturales et phénologiques) ; Cirad PVBMT (modèle ravageurs : bio-écologie des ravageurs et dynamique des populations). Il est aussi envisagé de développer des partenariats à l'international, au-delà de ceux déjà établis par l'Unité en d'Afrique de l'Ouest : University of Queensland et Queensland Department of Agriculture, Fisheries and Forestry.

4.3. Produits attendus

- Meilleure connaissance des interactions manguier – mouche des fruits;
- Adaptation d'un modèle écophysiologique du pêcher au cas du manguier ;
- Propositions d'outils permettant de concevoir des systèmes de cultures durables et respectueux de l'environnement : propositions d'une première version d'un modèle intégré du manguier;
- Publications scientifiques et communications à des congrès spécialisés;
- Montage de projets et obtention de financements;
- Encadrement et formation d'étudiants (masters, doctorants);

5. REFERENCES CITEES

- Amouroux P. (2013). Bio-écologie et dynamique des populations de la cécidomyie des fleurs (*Procontarinia mangiferae*), un ravageur inféodé au manguier (*Mangifera indica*), en vue de développer une protection intégrée. Thèse de doctorat, Université de la Réunion, 187 p.
- Aubertot J.N., Barbier J.M., Carpentier A., Gril J.J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I. & Voltz M. (2005). Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux. Rapport d'Expertise scientifique collective, INRA et Cemagref (France).
- Chander S., Kalra N., Aggarwal P.K. (2007). Development and application of crop growth simulation modelling

- in pest management. *Outlook on Agriculture*, 36, 63-70.
- Chatelin, M.H., Aubry, C., Garcia, F. (2007). A novel method for the sustainable management of wheat crops: exploration by simulation. *Agronomy and Sustainable Development* 27, 337-345.
- Cross J.V., Malavolta C, Jörg E. (1997). Guidelines for integrated production of stone fruits in Europe. IOBC Technical Guidline III. Piacenza, Italy. 23-24 February 1996. IOBC/WPRS Bulletin, 20, pp 51.
- Dambreville A., Lauri P-E., Trottier C., Guédon Y., Normand F. (2013a). Deciphering structural and temporal interplays during the architectural development of mango trees. *Journal of Experimental Botany*, 64: 2467-2480.
- Dambreville A., Normand F., Lauri P-E. (2013b). Plant growth co-ordination in natura: a unique temperature controlled law among vegetative and reproductive organs in mango. *Functional Plant Biology*, 40: 280-291.
- Dambreville A., Lauri P-E., Trottier C., Guédon Y., Normand F. (2012). Disentangling the structural and temporal interplays during the architectural development of trees. *Annals of Botany* (soumis).
- Diatta J. (2013-16). Vers la maîtrise du rendement et de la qualité de la mangue au Sénégal : déterminants de la floraison, fructification et impact de pratiques culturelles et de facteurs environnementaux Thèse de doctorat.
- Diatta P., Rey J-Y., Vayssières J-F., Diarra K., Coly E. V., Léchaudel M., Grechi I., Ndiaye S., Ndiaye O. (2013). Effect of phenology of citrus, mangoes and papayas fruits on the egg-laying preference of *Bactrocera invadens* (Tephritidae: Diptera). *Fruits*, 68 : 507-516
- Doré T., Le Bail M., Martin P., Ney B., Roger-Estrade J. (eds.) (2006). *L'agronomie aujourd'hui*.
- Fernandez-Delgado J., Grechi I., Ratnadass A., Casanova A., Gómez O., Sánchez M., Hernández M.I. (2013). Impact of some crop management practices on tomato infestation/infection by the whitefly-begomovirus complex in Cuba. *International Whitefly Symposium*. 1, 2013/05/20-24, Kolybari, Crete, Greece.
- Grechi I., Sane, C. A. B., Diame L., de Bon H., Benneveau A., Michels T., Huguenin V., Malezieux E., Diarra K., Rey J-Y. (2013). Mango-based orchards in Senegal: diversity of design and management patterns. *Fruits*, 68 : 447-466
- Grechi I., Tixier P., Rhino B., Malezieux E., Ratnadass A. (2012a). An individual-based modeling approach to assess trap cropping management of *Helicoverpa zea* in tomato field in Martinique. *International Symposium on Horticulture in Europe-SHE2012*. 2, 2012/07/1-5, Angers, France.
- Grechi I., Ould-Sidi M.-M., Hilgert N., Senoussi R., Sauphanor B., Lescourret F. (2012b). Designing integrated management scenarios using simulation-based and multi-objective optimization: Application to the peach tree-Myzus persicae aphid system. *Ecological Modelling*, 246: 47-59.
- Grechi I., Hilgert N., Sauphanor B., Senoussi R., Lescourret F. (2010). Modelling coupled peach tree-aphid population dynamics and their control by winter pruning and nitrogen fertilization. *Ecological Modelling*, 221: 2363-2373.
- HortSys (2013). *Projet Scientifique. Unité de recherche Fonctionnement agroécologique et performances des systèmes de culture horticoles*. Cirad Montpellier, 283 p.
- Hsu S., Hwang T., Yang K. (2003). A ratio-dependent food chain model and its applications to biological control. *Mathematical Biosciences*, 181, 55-83.
- Jayanthi P.D., Woodcock C.M., Caulfield J., Birkett M.A., Bruce T.J. (2012). Isolation and Identification of Host Cues from Mango, *Mangifera indica*, That Attract Gravid Female Oriental Fruit fly, *Bactrocera dorsalis*. *J Chem Ecol* 38: 361-369.
- Jestin A. (2013). *Modélisation du développement et de la phénologie du manguier. Rapport de stage de master 2*, Université Claude Bernard Lyon 1, 66 p.
- Kropff M.J., Teng P.S., Rabbinge R. (1995). The challenge of linking pest and crop models. *Agricultural Systems*, 49, 413-434.
- Léchaudel M., Vercambre G., Lescourret F., Normand F., Génard M. (2007). An analysis of elastic and plastic fruit growth of mango in response to various assimilate supplies. *Tree Physiology*, 27:219-230.
- Léchaudel M., Normand F., Génard M. (2006). Predicting harvest dates and quality of mango (cv 'Cogshall') fruit according to environmental factors. *8th International Symposium on Mango*. Sun City, South Africa.
- Léchaudel M., Génard M., Lescourret F., Urban L., Jannoyer M. (2005). Modeling effects of weather and source-sink relationships on mango fruit growth. *Tree Physiology*, 25:583-597.
- Lescourret F., Moitrier N., Valsesia P., Génard M. (2011) QualiTree, a virtual fruit tree to study the management of fruit quality. I. Model development. *Trees-structure and function* 25: 519-530.

- Macias J-N. (2013). Adaptation d'un modèle de culture développé sur pêcher (QualiTree) au cas du manguier. Grenoble, France : Université Joseph Fourier, 16 p. Master 1 (Biodiversité, Ecologie, Environnement).
- Mayer, D.G. (2002). *Evolutionary Algorithms and Agricultural Systems*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Ould-Sidi M.M., Lescourret F. (2011). Model-based design of integrated production systems: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 31, 571-588.
- Nordey T. (2011-14) Analyse expérimentale et modélisation de l'effet de l'environnement sur l'élaboration de la qualité et la maturation de la mangue. Thèse de doctorat.
- Quilot-Turion B., Ould Sidi MM., Kadrani A., Hilgert N., Génard M., Lescourret F. (2012). Optimization of genetic parameters of the 'Virtual Fruit' model to design peach ideotypes for sustainable production systems. *Eur J Agron* 42: 34-48
- Ratnadass A., Zakari-Moussa O., Kadi-Kadi H., Kumar S., Grechi I., Ryckewaert P., Salha H., Akourki M., Maâzou A.A., Siaka S.A., Hamza M., Kano H., Salami I. (*soumis à Agricultural and Forest Entomology, 07/2013*) Using pigeon pea as a perimeter trap crop to regulate fruit worm populations and damage to okra via multitrophic processes
- Rattanapun W., Amornsak W., Clarke A. R. (2009). *Bactrocera dorsalis* preference for and performance on two mango varieties at three stages of ripeness. *Entomol Exp Appl* 131: 243-253.
- Rhino B., Grechi I., Thibaut C., Ratnadass A. (*soumis à International Journal of Pest Management*). Corn as trap crop to control *Helicoverpa zea* in tomato field: importance of synchronization of phenology and choice of variety.
- Sansavini S. (1997). Integrated fruit production in Europe: Research and strategies for a sustainable industry. *Scientia Horticulturae*, 68, 25-36.
- Sauge M.-H., Grechi I., Poëssel J.-L. (2010) Nitrogen fertilisation effects on *Myzus persicae* aphid dynamics on peach: vegetative growth allocation or chemical defence? *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 136: 123-133.
- van Ittersum M.K., Leffelaar P.A., van Keulen H., Kropff M.J., Bastiaans L., Goudriaan J. (2003). On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy*, 18, 201-234.
- Vincenot D., Normand F. (ed.) (2009) *Guide de production intégrée de mangues à la Réunion, Montpellier: Cirad*, 121 p.

ANNEXE 1 : PROJET MODQUAL (EXTRAIT)**Call for Proposals 2012 under the key action DAMAGE of the SMaCH meta-program**

1. GENERAL INFORMATION ABOUT THE PROJECT	
Title	Modeling quality losses caused by pests on temperate and tropical perennial fruit crops: a generic framework for theoretical and applied issues
Coordinators	Michel Génard Domaine St Paul, Site Agroparc, 84914 Avignon Cedex 9 INRA, UR PSH Email: michel.genard@avignon.inra.fr ; Tel: +33432722458 Isabelle Grechi Bvd de la Lironde, TA B-103/PS4, 34398 Montpellier Cedex 5 CIRAD, UR HortSys Email: isabelle.grechi@cirad.fr ; Tel: +33467593120
Main research partners	INRA, UR1115 PSH (Plants and cropping Systems in Horticulture), Avignon INRA, UR1052 GAFL (Genetic Improvement of Fruits & Vegetables), Avignon CIRAD, UR103 HortSys (Agroecological functioning and performances of horticultural cropping systems), Montpellier & La Reunion
Other French and foreign partners	France: CIRAD/INRA/SupAgro, UMR QualiSud (Integrated food quality system); INRA, UERI Gotheron (Experimental research unit). Italy: Polytechnic of Milan, DEI (Department of Electronics and Information). Senegal: UCAD (University Cheikh Anta Diop of Dakar); ISRA, CDH (Senegalese Institute for Agricultural Researches, Centre for Horticultural Development). Benin: IITA (International Institute of Tropical Agriculture)
Duration & Budget	3 years; 60 k€
2. PROJECT DESCRIPTION	
Project summary	
<p>In Northern and Southern countries, fruit crops are facing great pest pressures that can result in fruit production losses. These losses, resulting from direct or indirect fruit damage - pests can indeed directly attack the fruits (organs 'sinks') or attack the vegetative parts of the tree (organs 'sources') - are both quantitative and qualitative. Past research focused mostly on quantitative losses (i.e., yield losses). Yet fruit quality (i.e., visual appearance, sensorial, nutritional or sanitary properties) and fruit shelf-life have growing importance in market requirements. We propose a generic process-based modeling framework to analyze and quantify losses in fruit quality induced by pests, considering a multi-criteria quality. We will also consider the consequences on fruit quality of management practices and crop genotypes usually adopted to cope with yield losses. This framework will allow (i) comparing the losses according to the type of pest impact (on 'sources' vs. 'sinks'), (ii) studying losses at different time scales (from the single year to the orchard life), and (iii) considering the trade-off between yield and quality losses in the context of biotic stress. The modeling framework will be based on existing models developed by the partner teams, including 'virtual' fruits and trees targeted on quality and/or taking into account 'sources' or 'sinks' infestations, as well as on team knowledge and literature data. We aim to develop a theoretical modeling framework of general value, and then apply it to three model pathosystems: mango-fruit fly (<i>Bactrocera</i> and/or <i>Ceratitidis</i> spp.) in tropical environment, peach-brown rot (<i>Monilinia</i> spp.) and peach-aphid (<i>Myzus persicae</i>) in temperate environment. This project will be a 'starter' for a more ambitious project aiming (i) to test the application range of the proposed modeling framework on different fruit-based pathosystems and consolidate this framework, (ii) to elucidate new research questions raised by modeling and simulations, and (iii) to address the plural economic dimension. It would involve multidisciplinary partners from national institutions, but also teams from foreign countries. It could be integrated into computing platforms and gain advantages from scientific interactions with modelers' communities pertaining to these platforms.</p>	
Specific objectives and Expected results	
<ul style="list-style-type: none"> Specific objectives: <ol style="list-style-type: none"> (1) Define a theoretical modeling framework of general value for perennial crops to analyze and quantify losses in fruit quality and yield caused by direct and indirect fruit damaging pests in both tropical and temperate environment. The framework will be used to address three main issues in the analysis of pest-induced crop losses, while considering the effect of management practices and crop genotypes chosen to limit yield losses: <ol style="list-style-type: none"> i. to compare production losses according to the type of pest impact (i.e., direct fruit damaging pests attacking 'sinks' organs vs. indirect fruit damaging pests attacking 'sources' organs) ii. to analyze how production losses are related to time scales in the case of indirect fruit damaging pests iii. to analyze trade-offs between yield losses and quality losses in the context of biotic stress in the case of direct fruit damaging pests 	

The project will also help in identifying the data to be acquired in order to calibrate specific modeling modules and validate the theoretical model for each of the three pathosystems, or to elucidate new research questions raised by modeling and simulations (cf. above). Confronting the peach and mango species within a same modeling framework will also help in identifying general and species-specific features.

(2) Reinforce collaborative and scientific exchanges between the research partners and with other scientific communities. The project will give the opportunity to consolidate the scientific relationships already existing between the PSH, HortSys and GAFL partners. It will contribute to share concepts and tools between the partners, and to promote the emergence of generic modeling modules (cf. above). It will also take advantage of the partners knowledge and expertise on a range of disciplines including genetic, eco-physiology and modeling (cf. §2.5). Partners could also integrate the modeling framework into computing platforms (e.g. OpenAlea; Pradal et al. 2008) and gain advantages from new collaborations with the scientific communities of these platforms.

(3) Preparing a pre-proposal framework for application to more ambitious and international projects. This project will be a 'starter' for a more ambitious project that would involve multidisciplinary partners from national but also foreign research teams, and aims: (i) to test the application range of the proposed modeling framework on different fruit-based pathosystems, and consolidate this framework, (ii) to elucidate new research questions raised by modeling and simulations (cf. above), and (iii) to address the economic dimension by considering its plural facets (e.g., food regulations, markets and labels, yield/quality trade-offs, consumer attitudes, etc.). Possible French partners could be from INRA, CIRAD, INRIA, INH institutes. Foreign partners could be teams with skills in theoretical and mathematical ecology (e.g., groups of M. Gatto at the Polytechnic of Milan, A.P. Gutierrez at University of California at Berkeley, T.G. Martin at CSIRO) and in agroecology on fruit plant-pests relations (e.g., partners, contributors to the ECA (Epidemiology Canopy Architecture) 2012 conference).

- **Expected deliverables:** a generic modeling framework, student reports, publications and communications, a proposal for an ambitious international project.

Methodology & Anticipated research steps

(1) Step 1_Building the modeling framework. A generic eco-physiological fruit tree model has been developed on peach ('QualiTree'; Lescouret et al. 2011). It simulates the effects of current year cultivation practices (i.e., pruning, fruit thinning, irrigation and tree training) on the intra-tree variability of fruit quality. In this project, the modeling framework, common for both peach and mango crops, will root on the 'QualiTree' model. It will also be based on other models developed by the partner teams as well as on team knowledge and literature data, including those acquired within projects involving the partners (e.g., APMed⁴ for peach-aphid-irrigation interactions, PIMAN¹ for fruit quality build-up on mango, WAFFI¹ for fruit fly population dynamics and damage to mango). When few data are available, new experimental data will be acquired. On *Peach*, the **'QualiTree' model will be enriched with the description of plant-pest interactions (P1)**. It will be linked to models representing fruit micro-cracking, fruit contamination by brown rot (Gibert et al. 2009) and functional peach-aphid interactions (Grechi et al. 2010, 2012) under the control of cultivation practices, and their effect on fruit yield and basic quality criteria. Currently, a 'virtual fruit' model of fruit growth, developed at the fruit bearing stem scale and integrating both the dry matter and the water accumulation within the fruit, has been completed by considering tissue composition in sugars and acids (Génard et al. 2007). It will be used to **extend the range of fruit quality criteria considered in the 'QualiTree' model (P2)**. The 'QualiTree' model will also be improved with more accurate descriptions of management effects and **links between consecutive years will be established to deal with long-term effect of pest infestations and management on fruit production (P3)**. On *Mango*, we will adapt the **'QualiTree' model to mango species (M1)**. We will mostly rely on a model of fruit growth and quality build-up that is developed at the fruit bearing stem and tree scales, based on eco-physiological concepts (Léchaudel 2005). It assesses the harvest date, weight, sugars and acids contents of fruit. It will be enriched with elements on fruit maturity and elaboration of secondary fruit compounds (i.e., aroma volatiles) (PhD of Nordey 2011-14). We will also benefit from additional knowledge on yield and fruit quality build-up and on the relationships between the maturity of host fruits and fruit flies that are being acquired in West Africa context (PhD of Diatta 2012-15; ISRA, CDH/ UCAD, Senegal). Scientific knowledge is also acquired on the phenology, growth and development of mango tree (PhD of Dambreville 2009-12) for further modeling. However, progresses in the modeling of mango-fruit fly interactions are few and a lot remain to be done. We will **identify factors (mostly fruit traits) and processes presumably involved in mango fruit attractiveness and sensitivity for fruit flies (M2)**, based on a bibliographic review and an experiment study. These preliminary results will serve to **develop and calibrate a model accounting for mango-fruit fly relationships in link with the mango 'QualiTree' model (M3)**. An eco-physiological based model will be preferred. Its development will depend highly on the compounds identified in step M2, and our ability to model their synthesis pathways. If it is not possible, an empirical model of fruit sensitivity for fruit fly attacks (approximation of a 'sensitive maturity index') will be developed. Finally, the 'Qualitree' model for mango will represent the dynamics of fruit quality build-up and

⁴ **APMed** : Apple and Peach in Mediterranean orchards – Integrating tree water status and irrigation management for coping with water scarcity and aphid control ; **PIMAN** : Integrated production of mangoes, pineapples and other tropical fruits, **WAFFI** : West African Fruit Fly Initiative.

potential fruit fly damages for one mango vegetative and fruiting flush. For both crop species, genetic control of plant functioning, quality build-up and fruit or plant susceptibility to pests will be accounting by means of parameters for different related processes represented in the model. Model validation will be qualitative and subjected to 'system' data availability.

(2) Step 2_Analyze of fruit losses caused by pests. We will use the modeling framework for simulations, and analysis of their results will allow to answer the three main issues related to pest-induced fruit losses listed in §2.3.1. First, the issue about the type of pest impact will be addressed on peach crop by comparing losses caused by brown rot vs. those caused by aphid (i.e., direct vs. indirect fruit damaging pests). Second, the issue about time scales will be addressed on peach crop by comparing losses induced by successive aphid infestations and levels of aphids the crop can tolerate over time, from the single year to the orchard life. Third, the issue about trade-offs between quantitative vs. qualitative losses will be addressed by analyzing how fruit quality and risk of yield losses caused by fruit fly on mango and by brown rot on peach evolved with fruit development and maturation. For all these simulation analyses, the genetic and cultivation controls will be considered by varying the values of genetic and cultural parameters within a range of 'potential' values obtained from team expertise or literature data. In further project, model-based optimization approach may be used to find genotypes and cultural scenarios (i.e., combinations of parameters values) able to maintain satisfying fruit yield and quality under biotic stress.

Milestones:

- Year 1** **Kickoff meeting:** it will be restricted to main research partners to share all available models and tools
- Step 1_Building of the modeling framework:** on Peach (P1,P2,P3) and on Mango (M1)
- Year 2** **Step 1_Building of the modeling framework:** on Peach (P1,P2,P3) and on Mango (M1,M2,M3)
- Year 3** **Step 2_Analyze of fruit losses caused by pests.**
- Final meeting:** it will be organized to share the main results of the project and will be open to researchers other than main partners to promote scientific exchanges and collaborations, in particular to prepare a proposal for an ambitious international project in continuation of the present project.

Research partners & Budget

• Team and specific competencies of the main research partners:

GAFL Team: B. Quilot

HortSys Team: I. Grechi, M. Léchaudel, F. Normand, J.-Y. Rey (CIRAD/ISRA), J.-F. Vayssières (CIRAD/IITA)

PSH Team: D. Bevacqua, M. Génard, F. Lescourret, M—M. Ould-Sidi

• Provisional budget: 60 k€

<i>Expenditure item</i>	<i>Year 1: 20k€</i>	<i>Year 2 : 20k€</i>	<i>Year 3: 20k€</i>
Undergraduate student training (grants) ¹	-3 students (step 1: P1, P2, M1): 9000€	-3 students (step 1: P3, M2, M3): 9000€	-2 students (step 2 on peach/mango): 6000€
Equipment & functioning for computing, experiment, etc	8500€	8500€	8500€
Visio-conference and travel for scientific exchanges between the partners (including for co-supervision of students), and meetings	-Kick-off meeting -Scientific exchanges 2500€	-Scientific exchanges 2500€	-Final meeting, with support for guest researcher(s) - Scientific exchanges 5500€

¹ co-direction by partners of two teams will be preferred